Hugo Gomes da Silva

**Estudos preliminares sobre a aplicação de lasers de alta
potência na perfuração de revestimentos de poços**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Arthur Martins Barbosa Braga
Co-orientador: Luiz Carlos Guedes Valente

Rio de Janeiro
Setembro de 2014

Hugo Gomes da Silva

**Estudos preliminares sobre a aplicação de lasers de alta potência
na perfuração de revestimentos de poços**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Dr. Luiz Carlos Guedes Valente

Co-orientador

WSN Sistemas de Monitoração

Dra. Sully Milena Mejía Quintero

PUC-Rio

Dr. Giancarlo Vilela de Faria

PUC-Rio

Dr. Cicero Martelli

UTFPR

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de setembro de 2014

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Hugo Gomes da Silva

Graduou-se em Engenharia de Controle e Automação pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense (IFF), em 2011. Atualmente trabalha no Laboratório de Sensores a Fibra Óptica da PUC-Rio. Tem estudado a viabilidade na utilização de lasers de alta potência para perfurar revestimento de poços na indústria do petróleo.

Ficha Catalográfica

Silva, Hugo Gomes da

Estudos preliminares sobre a aplicação de lasers de alta potência na perfuração de revestimentos de poços / Hugo Gomes da Silva; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga ; co-orientador Luiz Carlos Guedes Valente. – 2014.

69 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Laser de alta potência. 3. Densidade de potência. 4. Canhoneio. 5. Laser a fibra. I. Braga, Arthur Martins Barbosa. II. Valente, Luiz Carlos Guedes. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

À Minha Família

Agradecimentos

A Deus, pela dádiva de desfrutar a vida com saúde e motivação para superar os desafios que os projetos de longo curso exigem.

Gostaria de agradecer aos meus pais Fernando e Nadília pelo esforço e amor que me designaram durante toda minha vida, meus irmãos Higor e Flávia pelo apoio.

Ao meu orientador Arthur Martins Barbosa Braga pelo apoio e pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Aos meus co-orientadores Luiz Carlos Guedes e Sully Milena Mejía, pelo constante apoio, paciência e por me passar dicas valiosas para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao pessoal do Laboratório de Sensores a Fibra Óptica (LSFO) pelo tempo concedido para me ajudar.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica que contribuíram no meu crescimento acadêmico.

A todos os amigos e familiares que de certa forma me ajudaram, apoiaram e me estimularam para a realização desse trabalho.

A Ana Beatriz pela paciência e apoio.

Resumo

Silva, Hugo Gomes; Braga, Arthur Martins Barbosa. **Estudos preliminares sobre a aplicação de lasers de alta potência na perfuração de revestimentos de poços**, Rio de Janeiro, 2014. 69p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação faz parte de um projeto mais abrangente que visa caracterizar os parâmetros ideais para perfuração e corte a laser em rochas, metais e cimentos tipicamente utilizados na indústria do petróleo. Este trabalho teve por objetivo de caracterizar cortes a laser em placas de aço. Procurou-se correlacionar a morfologia do corte e a formação de rebarbas com parâmetros operacionais, tais como densidade de potência e posição do ponto focal. O estudo foi desenvolvido para o aço SAE 1020 com e sem anteparo rochoso (Travertino). Foram avaliadas também as mudanças na microestrutura de regiões adjacentes do aço duplex 2205 para diferentes faixas de densidade de potência. Finalmente, avaliou-se também o uso do laser no corte do aço inox submerso em água. Conclui-se que existe uma formação de rebarba, que aumenta conforme a densidade de potência diminui. Por outro lado, quanto maior a densidade de potência, maior é a extensão da mudança na microestrutura do aço. O corte de aço com anteparo rochoso abre novas perspectivas para o desenvolvimento de uma ferramenta baseada em laser de alta potência para completção de poços na indústria do petróleo.

Palavras-chaves

Laser de alta potência; densidade de potência; canhoneio; laser a fibra.

Abstract

Silva, Hugo Gomes; Braga, Arthur Martins Barbosa (Advisor). **Preliminary studies on the use of high power lasers for perforation of well casings**, Rio de Janeiro, 2014. 69p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work is part of a larger project that aims to characterize the optimal parameters for laser cutting and drilling into rocks, metals and cement typically used in the oil industry. This study had as objective to characterize laser cuts in steel plates. An attempt to establish a correlation between the morphology of the cut and the burrs with operating parameters such as power density and position of the focal point. The study was developed for the SAE 1020 steel with and without rocky bulkhead (Travertine). Also, the changes in the microstructure of adjacent regions of duplex steel in 2205 for different ranges of power density were assessed and finally it was evaluated the use of laser cutting of stainless steel submerged in water. It follows that there is a burr formation, which increases as the power density decreases. On the other hand, the higher the power density, the greater is the extent of change in the steel microstructure. Cutting steel with rocky bulkhead opens new perspectives for the tool development with high power laser for well completion in the oil industry tool.

Keywords

High power laser; power density; perforation; fiber laser.

Sumário

1. Introdução	14
1.1.Motivação	16
1.2.Objetivos	16
1.3.Estrutura do trabalho	16
2. Estado da arte do corte laser	17
2.1.Laser	18
2.1.1.Laser a Fibra	19
2.1.2.Potência e densidade de energia (potência)	20
2.1.3.Qualidade do feixe	21
2.1.4.Tipos de corte a laser de alta potência	22
2.1.4.1.Corte por fusão	22
2.1.4.2. Corte por fusão reativa	23
2.1.4.3. Corte por vaporização	24
2.3.Interação Laser- Matéria	25
2.3.1.Refletividade	25
2.3.2. Coeficiente de Absorção	27
2.3.3.Difusidade térmica	28
3 Montagem experimental	29
3.1.Desenvolvimento da banca experimental (CNC)	30
3.1.1.Projeto Mecânico	30
3.1.2.Projeto Eletroeletrônico	30
3.1.3.Software Mach 3	32
3.1.4.Projeto controle de poluição	34
3.2.Laser YLS 1500 – TR	35
4. Materiais, Metodologia e Resultados	37
4.1. Materiais	37

4.2. Metodologia	38
4.2.1. Experimento 1 – Potência constante e variação da densidade de potência	40
4.2.1.1. Resultados do Experimento 1	42
4.2.2. Experimento 2 – Densidade de potência constante e variação da potência	50
4.2.2.1. Resultados do Experimento 3	51
4.2.3. Experimento 3 - Corte a laser no Aço Inox AISI 304L submerso em água.	57
4.2.3.1. Resultados do Experimento 3	57
4.2.4. Experimento 4 - Análise metalográfica do Aço Duplex 2205	61
4.2.4.1. Resultados do Experimento 4	62
5. Conclusão	66
6. Referências Bibliográficas	67

Lista de Figuras

Figura 1 - Bico de corte a laser do Peter.	17
Figura 2 - Relação da demanda pelo sistema a laser e ferramentas de máquina em função dos anos.	18
Figura 3 - Esquema simplificado do laser.	19
Figura 4 - Esquematização do laser a fibra.	20
Figura 5 - Ilustração do corte por fusão.	22
Figura 6 - Corte a laser por fusão reativa.	23
Figura 7 - Esquematização do corte laser por vaporização.	24
Figura 8 - Refletividade do material em função da temperatura.	26
Figura 9 - Vista geral da CNC.	29
Figura 10 - Circuito elétrico de potência e unidade de comando com os drives (1) e a placa controladora (2)	31
Figura 11 - Tela de visualização Mach3.	34
Figura 12 – Lavador de gases.	35
Figura 13 – Laser a fibra YLS – 1500 TR com potência máxima de 1500 W.	36
Figura 14 – Ponteira do Laser YLS-1500 TR	36
Figura 15 - Trajetória espiral.	39
Figura 16 – Diagrama esquemático da focalização do feixe.	40
Figura 17 – Fotografia das amostras utilizadas nos experimentos 1.3 e 2.3.	41
Figura 18 - Esquema dos valores da densidade de potência em função a espessura da amostra.	43
Figura 19 - Gráfico referente ao Experimento 1.1.	44
Figura 20 - Superfície inferior da amostra do Experimento 1.1.	45
Figura 21 - Gráfico referente ao Experimento 1.2.	46
Figura 22 - Superfície inferior da amostra Experimento 1.2.	47
Figura 23 - Gráfico referente ao Experimento 1.3.	48
Figura 24 - Material depositado na parede do anteparo do experimento 1.3.	49

Figura 25 – Imagem do resultado final da amostra do experimento 1.3.	49
Figura 26 - Gráfico referente ao Experimento 2.1.	53
Figura 27 - Exemplo do Experimento 2.	54
Figura 28 - Gráfico referente ao Experimento 2.2.	55
Figura 29 - Gráfico referente ao Experimento 2.3.	56
Figura 30 – Diagrama esquemático e fotografia da montagem experimental.	57
Figura 31 – Fotografia do experimento embaixo da água para a primeira (a) e segunda (b) etapa respectivamente	58
Figura 32 – Fotografia do experimento embaixo da água para a primeira (a) e segunda (b) etapa respectivamente	58
Figura 33 - Resultado final da placa após os ensaios na água.	59
Figura 34 - Gráfico da diminuição da densidade de potência em função da profundidade.	60
Figura 35 - Gráfico espectral da absorção em função do comprimento de onda.	61
Figura 36 - Esquema de distribuição dos cortes feitos na amostra nas densidades potência alta (1), média (2) e baixa (3).	62
Figura 37 - Seção transversal da amostra base. A microestrutura é composta por ferrita e austenita.	63
Figura 38 - Seção transversal das amostras.	64
Figura 39 - Modelo gerado, no qual mostra a tendência da extensão da área afetada em função da densidade de potência.	65

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Coeficientes de refletividade no comprimento de onda 1063nm.	25
Tabela 2 - Valores de intensidade do feixe no aço.	27
Tabela 3 - Difusidade térmica.	28
Tabela 4 - Dados técnicos do laser Nd:YAG YLS 1500 TR.	35
Tabela 5 - Configurações das amostras do Experimento 1.	40
Tabela 6 - Parâmetros de operação do experimento 1.	41
Tabela 7 - Imagens referentes ao Experimento 1.1.	45
Tabela 8 - Imagens referentes ao Experimento 1.2.	47
Tabela 9 – Imagens referentes ao Experimento 1.3.	50
Tabela 10 - Configurações das amostras do Experimento 2.	50
Tabela 11 - Parâmetros de operação do experimento 2.	51
Tabela 12 - Relação de proporção do Spot size com o passo da espiral.	52
Tabela 13 - Imagens referentes ao Experimento 2.1.	53
Tabela 14 - Imagens referentes ao Experimento 2.2.	55
Tabela 15 - Imagens referentes ao Experimento 2.3.	56
Tabela 16 - Parâmetros de operação do experimento 4.	61

Lista de Símbolos

E = intensidade

E_o = Intensidade inicial

α = Coeficiente de absorção

Z = Profundidade

K_t = Condutividade Térmica

k = Difusidade Térmica

c = Calor específico

ρ_m = Densidade do material

ρ_p = Densidade de potência

D_m = Diâmetro do feixe focalizado

D_o = Diâmetro do feixe de entrada

M^2 = Distribuição de energia do ressonador

λ = Comprimento de onda

f = Distância focal da lente

1

Introdução

A tecnologia laser desperta grandes interesses, pois consegue agregar inúmeras vantagens. As mais importantes são: possibilidade de uso de atmosfera controlada, o processo sem o contato e sem desgaste de ferramenta, alta densidade e controle de energia, facilidade no processo de automação, entre outras. Por isso, em vários segmentos do setor industrial, o processamento de materiais a laser tornou-se uma alternativa atraente e competitiva em relação aos métodos convencionais de manufatura. Nos dias de hoje a sua aplicação é diversificada, principalmente devido aos seus benefícios e a sua versatilidade, abarcando mercados como o da indústria automotiva, aeroespacial e médica.

Os lasers de alta potência foram desenvolvidos para o programa Strategic Defense Initiative, mais conhecido como Guerra nas Estrelas, concebido nos Estados Unidos nos anos 1980. Este programa consistia em criar um sistema de defesa contra mísseis balísticos que interceptassem durante o deslocamento, minimizando os efeitos. Porém, este projeto foi abandonado após o fim da guerra fria. O legado deixado por esta iniciativa foram os lasers de alta potência (a partir de 1 kW) que puderam ser aplicados nas indústrias para processamento de materiais.

Nas últimas décadas, o uso da tecnologia laser tem sofrido uma forte evolução em três vertentes fundamentais ligadas ao equipamento, ao desenvolvimento dos processos de transformação de materiais, no sentido da interação laser-sólido, e ao desenvolvimento de sistemas de movimentação e controle, no sentido de aumentar a produtividade dos equipamentos. (Faro, 2006)

O conceito de usar lasers para perfurar rocha tem sido discutido nas indústrias de petróleo e gás desde o desenvolvimento do laser de alta potência. O livro de Mauer em técnicas avançadas de perfuração resumiu as primeiras tentativas de desenvolver uma broca de laser baseado no CO₂ em 1960, mas concluiu que a tecnologia era prematura devido ao seu tamanho e complexidade. Em 2002, Ramona Graves pela Colorado School of Mines (CSM), demonstrou o potencial de perfuração a laser, destruindo uma rocha com um avançado laser químico. Mais tarde caracterizou a capacidade de um laser de diodo de alta potência para perfurar rocha. Na época, no entanto, ainda havia lacunas substanciais na tecnologia que impediram o desenvolvimento comercial. A inovação que abriu a perspectiva de comercialização de perfuração a laser, foi a introdução de um laser de fibra de 10kW por IPG Photonics em 2008. Um ano depois, com a ajuda do CSM, a Foro Energy começou a desenvolver uma ferramenta híbrida de perfuração (Zediker, 2014).

A ferramenta híbrida de perfuração consiste em um laser de alta potência integrado com a broca de perfuração. Este funciona da seguinte maneira, o feixe de laser é irradiado sobre a superfície da rocha, em seguida acontece o efeito de espalação na rocha e são introduzidas microfraturas que permitem a fácil remoção da camada de rocha fraturada com a broca (Vanguard, 2014).

Este processo a laser mecânico híbrido reduz dramaticamente as necessidades de energia. Plataformas de grandes brocas exigem cerca de 2000 HP, o equivalente a 1,5 MW. Usando um laser a fibra de 20 kW gasta-se apenas 100 kW de potência e a broca remove a rocha fragilizada utilizando apenas 10 HP, ou 7,5 kW, de energia (Vanguard, 2014).

1.1.

Motivação

Com a disponibilidade no mercado de lasers cada vez mais potentes, como por exemplo, laser a fibra de 50 kW, abrem-se novas perspectivas para o desenvolvimento de ferramentas de canhoneio baseados em laser de alta potência. Dessa forma, se fazem necessários estudos que permitam determinar as densidades de potência necessárias para poder realizar o corte dos diferentes materiais presentes no poço.

1.2.

Objetivos

O objetivo deste trabalho foi caracterizar cortes a laser em placas de aço SAE1020 com e sem anteparo, avaliar o corte do laser na água e analisar os efeitos da densidade de potência nas regiões adjacentes ao corte no aço inox.

1.3.

Estrutura do trabalho

Capítulo 1: Introdução, Objetivos e Estrutura do Trabalho.

Capítulo 2: Estado da Arte do Corte a Laser.

Capítulo 3: Montagem experimental.

Capítulo 4: Materiais, Metodologia e Resultados.

Capítulo 5: Conclusões.

Referências Bibliográficas.

2 Estado da arte do corte laser

O primeiro corte a laser foi realizado em maio de 1967, onde se utilizou pela primeira vez um gás auxiliar. Foi o Peter Houldcroft quem teve a ideia de fazer a combinação de um feixe focalizado do laser com o gás auxiliar de oxigênio, que tinha por objetivo melhorar a precisão e a velocidade do corte. Para isso, o Houldcroft projetou um "bico de corte a laser", que tinha um diâmetro de 2,5mm de abertura, e possuía uma câmara de pressurização do gás oxigênio, que fornecia uma corrente de gás auxiliar co-axial na zona do foco do feixe do laser. (Figura 1)

Figura 1 - Bico de corte a laser do Peter.

Desde 1967, os equipamentos de corte por laser têm sofrido evoluções em vários aspectos. No campo da potência, o crescimento tem sido contínuo, sendo possível encontrar no mercado, máquinas de corte por laser equipadas com laser de CO₂ com potência de 10 kW (Rofin), laser a fibra de 50kW (IPG Photonics), laser semicondutores de 4,5kW (Dilas), entre outros.

Atualmente os lasers de alta potência tem uma maior aplicação nos processos de corte e solda de aço carbono, aço inoxidável e outros metais. As fábricas que constroem máquinas-ferramenta de corte para as empresas metalúrgicas e as companhias que desenvolvem equipamentos automatizados para a soldagem (muito utilizado nas fábricas de

automóveis) utilizam lasers que variam na faixa de 1 a 20 kW de potência, mas são na sua maioria na faixa 2-6kW (Liebowitz, 2014). Além disso o laser é usado em diversas áreas, quase sempre em processos que exijam alta qualidade e precisão na geometria do componente e na borda do corte.

O mercado global de vendas do sistema a laser para processamento de materiais foi responsável pela movimentação de 10,2 bilhões de dólares em 2012. O forte crescimento pela demanda de sistemas de laser reflete o renascimento da manufatura nos EUA após a crise de 2009. A Coréia teve um aumento da demanda de 30% do sistema laser, a China registrou um crescimento moderado na demanda de 11% e no Japão foi de apenas 9% (Mayer, 2013). A Figura 2 mostra o histórico das proporções de vendas realizadas desde 1993 até 2012.

Figura 2 - Relação da demanda pelo sistema a laser e ferramentas de máquina em função dos anos.

Fonte: Mayer, 2013

2.1. Laser

A palavra LASER é uma sigla que tem como significado Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Amplificação da luz por emissão da radiação estimulada).

Um laser consiste principalmente de 3 partes. A primeira parte é o chamado meio ativo, que pode ser gasoso, sólido ou líquido. A segunda parte é a fonte, que tem a função de provocar estados excitados, a fim de que nos decaimentos haja produção de luz. Ela atua no meio ativo, muitas

vezes emitindo fótons sobre ele, e isso faz com que um grande número de átomos fique no estado excitado. A terceira parte importante do laser é a cavidade óptica ou ressonador. Sua função é fazer com que os fótons que emergem do sistema voltem para ele, produzindo mais e mais emissão estimulada. Isso é feito por meio de espelhos que são colocados nas extremidades dessa cavidade e provocam a reflexão dos fótons de volta à amostra. A Figura 3 é um esquema simplificado dessas 3 partes do laser.

Figura 3 - Esquema simplificado do laser.

2.1.1.

Laser a Fibra

Nesta seção discute-se o laser a fibra por ser o laser utilizado neste trabalho. Os lasers a fibra caracterizam-se pelo seu tamanho compacto, alta eficiência e excelentes parâmetros do feixe.

Um laser de fibra é feito de vários metros de fibra monomodo ativo multi-revestido, onde o meio ativo é a própria fibra óptica sendo dopada com íons de erbium, ytterbium, neodýmium ou thalium, com a finalidade de amplificar o sinal emitido. Nas fibras são inseridos dois filtros (Rede Bragg) que provocam uma restrição dos comprimentos de onda. Estes atuam como espelhos de uma cavidade ressonante normal, permitindo estabilizar o comprimento de onda da energia fornecida, reduzir flutuações na intensidade do feixe laser e eliminar modos espectrais aberrantes (Figura 3).

Figura 4 - Esquemática do laser a fibra.
Fonte: Wandera, 2006

Atualmente, para o laser a fibra, o limite de potência para um feixe de modo singular está em 20kW para ambos modos de operação (contínuo ou pulsado), laser dopado com ytterbium. Possui alta qualidade do feixe para um comprimento de onda de 1.070nm, o que torna apropriado para a soldagem e corte de metais. A eficiência da fibra do laser Yb é maior do que 30%, o que possibilita que o dispositivo seja refrigerado por ar.

Os lasers a fibra são facilmente integrados em qualquer tipo de sistema. A divergência é baixa, mesmo com elevada potência. São extremamente estáveis e são praticamente isentos de manutenção, pois não existe necessidade de troca de lâmpadas ou diodos. A boa qualidade do feixe permite a obtenção de um ponto focal substancialmente menor do que os lasers convencionais.

2.1.2.

Potência e densidade de energia (potência)

A potência de um laser é a energia total emitida sob a forma de luz laser por segundo, já a densidade de energia (ρ_p) do laser é a potência dividida pela área sobre a qual o feixe é concentrado.

$$\rho_p = \frac{\text{Potência incidente}}{\text{Área do ponto}} = \text{W/cm}^2 \quad (2)$$

A alta densidade de potência no feixe é desejável para aplicações de corte, pois possibilita um rápido aquecimento na superfície que resulta em altas velocidades e excelente qualidade de corte. Além disso, a refletividade da maioria dos metais é alta em baixa densidade de potência, mas muito menor em altas intensidades e corte de materiais mais grossos requer intensidades mais elevadas.

2.1.3.

Qualidade do feixe

A qualidade do feixe de laser é caracterizada pelo modo de um feixe, que é a distribuição de energia através da sua seção transversal. Uma distribuição uniforme de energia sinaliza um bom modo do feixe, que é essencial para o corte a laser. Modos de ordem superior podem resultar numa baixa qualidade de corte, devido ao aquecimento do material fora da área do corte.

A Equação 3 relaciona os parâmetros de qualidade do feixe (M^2), comprimento de onda (λ), diâmetro do feixe de entrada (D_σ), diâmetro do feixe focalizado (D_{min}) e a distância focal (f).

$$D_{min} = \frac{4.M^2.\lambda.f}{\pi.D_\sigma} \quad (3)$$

O M^2 assume o valor 1 quando a distribuição de energia no ressonador descreve um comportamento de uma distribuição gaussiana. Por outro lado, alguns lasers de alta potência podem ter valores muito elevados de M^2 , muitas vezes acima de 100 e em alguns casos muito perto de 1000. Em lasers de estado sólido convencionais, este elevado valor é frequentemente resultado de distorções da frente de ondas induzidas termicamente no meio de ganho. No caso dos lasers semicondutores de alta potência, a baixa qualidade do feixe resulta da operação com um guia de onda altamente multimodo. Em ambos os casos, a baixa qualidade do feixe está associada à excitação de modos de ordem superior.

2.1.4.

Tipos de corte a laser de alta potência

2.1.4.1.

Corte por fusão

O processo de corte por fusão consiste no aquecimento acima da temperatura de fusão superfície da amostra. O material fundido é ejetado para baixo ou para trás, na frente do corte pela ação do gás de assistência, aplicado coaxialmente. A absorção provoca a fusão do substrato e a matéria em fusão é expulsa pela força de arrasto do escoamento de alta velocidade do gás auxiliar. Corte por fusão a laser é aplicável a todos os metais aços especialmente inoxidável e outras ligas de aços, alumínio e titânio de alta liga. Tem-se uma alta qualidade de corte nas bordas, mas as velocidades de corte são relativamente baixas em comparação aos mecanismos de corte de gás ativos. A vantagem deste processo é que as arestas de corte resultantes são livres de óxidos e têm a mesma resistência à corrosão, como o substrato (Figura 5).

Figura 5 - Ilustração do corte por fusão.
Fonte: Roфин, 2004.

2.1.4.2

Corte por fusão reativa

O princípio do corte por fusão reativa consiste no feixe de laser focalizado aquecer o material numa atmosfera oxidante e estimular uma reação exotérmica de oxidação do oxigênio com o material. A reação exotérmica facilita o processo de corte a laser, proporcionando a entrada de calor adicional na zona de corte. Isto resulta em maiores velocidades de corte em relação ao corte a laser com gases inertes, ou seja, usa-se o oxigênio como gás auxiliar para a ejeção do material fundido e para promover a reação exotérmica. Este tipo de corte é aplicável ao aço carbono e aço baixa liga (Figura 6).

A vantagem deste tipo de corte é a formação da camada de óxido sobre a frente de corte, que aumenta a absorção da radiação laser em relação à absorção de um material metálico fundido puro.

Figura 6 - Corte a laser por fusão reativa.
Fonte: Rofin(2004)

2.1.4.3

Corte por vaporização

Este processo ocorre quando a energia do feixe é suficiente para aquecer o material acima do seu ponto de ebulição e o material deixa a superfície sob a forma de vapor (Figura 7).

A incidência do feixe com alta densidade de potência na superfície provoca o aquecimento do material. À medida que a temperatura aumenta, a refletividade da superfície diminui e em seguida é dada uma rápida subida de temperatura até ao ponto de ebulição, o que leva à formação de vapor. O vapor deixa a superfície com uma velocidade elevada arrastando consigo partículas criando uma cavidade cilíndrica denominada “keyhole”. A formação do “keyhole” provoca um aumento repentino de absorção devido a múltiplas reflexões, o que por sua vez leva o “keyhole” a se desenvolver em profundidade na chapa. Este método tem um requisito de energia elevada que depende das propriedades térmicas do material.

Para o corte de metais, o corte por vaporização a laser é o método com a velocidade mais baixa entre outros métodos; no entanto, ele é adequado para peças finas que tenham geometrias complexas de corte e alta precisão.

Figura 7 - Esquematisação do corte laser por vaporização.
Fonte: Rofin (2004)

2.3.

Interação Laser- Matéria

A vantagem de se utilizar o laser em processamento de materiais é a sua capacidade de concentrar altos valores de energia numa pequena área focalizada, produzindo assim, um rápido aquecimento na região.

A compreensão dos processos físicos que ocorrem durante a interação do laser com a matéria é importante para se conhecer as capacidades e limitações no processamento de materiais utilizando um laser.

As características relevantes do material para o processamento são: coeficientes de absorção e de reflexão do material no comprimento de onda do laser, e a difusidade térmica.

2.3.1.

Refletividade

A refletividade é um índice que indica a parcela do feixe de luz incidente que é refletida pelo material. Ela é definida como a razão entre a energia radiante refletida e a incidente sobre a superfície, sendo, portanto, um número adimensional compreendido entre 0 e 1.

Fazendo uma generalização, pode-se dizer que quanto maior for o comprimento de onda do laser, maior será a refletividade do material. Os valores dos coeficientes de refletividade para comprimento de onda de 1063nm são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficientes de refletividade no comprimento de onda 1063nm.

Material	Refletividade
Alumínio	0,91
Cobre	0,99
Ferro	0,64
Aço	0,61

Molibdênio	0,57
Níquel	0,74
Chumbo	0,84
Estanho	0,46
Tálio	0,63
Tungstênio	0,58
Vidro	0,04
Zinco	0,58

Além do comprimento de onda, a temperatura também influencia na refletividade do material, ou seja, para alguns materiais, a refletividade aumenta quando a temperatura sobe (como o aço), enquanto em outros diminui (como o alumínio e o cobre). Conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Refletividade do material em função da temperatura.
Fonte:

2.3.2

Coeficiente de Absorção

A absorção é um fenômeno óptico relacionado com a diminuição da energia da luz ao atravessar um determinado meio. Neste processo, um feixe de luz é atenuado ao longo da sua direção de propagação, sendo transmitida apenas a parcela de luz que não foi absorvida pelo material. A parte que é absorvida, quantificada pelo coeficiente de absorção (α), se transforma em calor.

$$E(z) = E_0 e^{-\alpha z} \quad (4)$$

Onde o $E(z)$ é a intensidade alcançada na profundidade z , E_0 é a intensidade absorvida e o coeficiente de absorção, que é uma propriedade do material que descreve a fração de energia depositada por unidade de profundidade no material.

$$|\Delta E(z)| = E_0 \alpha e^{-\alpha z} \Delta z \quad (5)$$

Quando a energia é absorvida pelo material acontecem três efeitos: fusão, vaporização e formação de plasma.

Por exemplo, no aço, a fusão ocorre quando a intensidade do laser é aproximadamente 10^5 W/cm^2 , já quando a densidade é de 10^6 W/cm^2 ocorre a vaporização antes mesmo de se acumular o material fundido. Quando a intensidade do laser é acima de 10^8 W/cm^2 há formação de plasma (Steen, 2010). A tabela 2 mostra os valores de intensidade de energia em função dos efeitos.

Tabela 2 - Valores de intensidade do feixe no aço.

Efeitos	Intensidade do feixe	Temperatura (K)
Fusão	$\sim 10^5 \text{ W/cm}^2$	1800
Vaporização	$> 10^6 \text{ W/cm}^2$	3100
Formação de plasma	$\geq 10^8 \text{ W/cm}^2$	----

2.3.3.

Difusidade térmica

Fisicamente, difusidade térmica demonstra o quão rápido o material recebe e transmite a energia térmica.

Quando a difusidade térmica do material é baixa significa que o calor tem dificuldade em avançar para o interior do material. Em contrapartida, para valores mais altos de difusidade, causa-se uma rápida remoção de calor da superfície, o que pode reduzir a quantidade de material fundido. A difusidade térmica é caracterizada por:

$$k = \frac{K_t}{\rho_m c} \quad (6)$$

Ou seja, a propagação do calor no material é regida por suas propriedades termo físicas como condutividade térmica (K_t), calor específico (c) e densidade do material (ρ_m).

Em geral a difusidade térmica é mais baixa em ligas do que em metais puros. A tabela 3 mostra os valores da difusidade térmica de alguns metais.

Tabela 3- Difusidade térmica.

Metal / Liga	Difusidade Térmica (cm^2/s)
Alumínio (Puro)	0,850
Alumínio 2024	0,706
Alumínio A 13	0,474
Ferro (Puro)	0,202
Aço Carbono	0,119
Aço Inoxidável	0,056

3

Montagem experimental

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento da bancada experimental empregada no estudo de perfuração de rochas e aços utilizando laser de alta potência. O objetivo foi desenvolver uma bancada experimental que permitisse controlar a movimentação do laser de alta potência. Optou-se então pelo desenvolvimento de uma máquina CNC.

A bancada experimental foi projetada e construída durante o desenvolvimento desta dissertação, uma vista global pode ser observada na foto da Figura 9. Encontra-se no laboratório de Sensores a Fibra Óptica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Figura 9 - Vista geral da CNC.

3.1. Desenvolvimento da banca experimental (CNC)

O desenvolvimento da máquina foi dividido em quatro principais etapas:

1. Projeto mecânico,
2. Projeto eletroeletrônico,
3. Software
4. Projeto controle de poluição

3.1.1. Projeto Mecânico

A máquina CNC construída baseia-se na configuração do tipo cartesiana, onde a amostra fica parada enquanto a cabeça do laser executa os movimentos de avanço X, Y e Z. A máquina desenvolvida possui volume de trabalho de 600x600x300 mm.

A estrutura de base é composta por módulos de perfis de alumínio 45x45 mm, o que atende aos requisitos da facilidade da montagem e de uma boa rigidez estática e dinâmica.

Os eixos X, Y e Z contêm sistema de movimentação composto por guias lineares do tipo trilho com patins e fusos de esferas com passo 10 mm, estes possibilitam a alta precisão de posicionamento. A transmissão de movimento é realizada pelo fuso que é acoplado ao servo motor.

3.1.2. Projeto Eletroeletrônico

Para realizar o acionamento e controle dos diferentes componentes elétricos da bancada experimental, ou seja, os servos motores, a válvula do gás auxiliar, os sensores de fim de curso e o laser, um circuito elétrico

de potência foi desenvolvido. A Figura 10 mostra o circuito elétrico e a unidade de comando.

Figura 10- Circuito elétrico de potência e unidade de comando com os drives (1) e a placa controladora (2)

Para acionamento dos eixos cartesianos foi usado a tecnologia Hiwin de servo acionamento AC (servo motores). Neste projeto foram empregados servo acionamentos de 100W para os eixos X,Y e Z. O servo acionamento do eixo Z possui freio eletromagnético de segurança para travar o mesmo em caso de falta de energia elétrica.

Além da excelente característica torque versus velocidade dos servos motores CA, os parâmetros de controle de cada eixo são ajustados de forma automática por um programa desenvolvido pelo próprio fabricante. Este processo de ajuste é realizado da seguinte forma: primeiro o servo drive é conectado a um computador via porta USB, a seguir o programa é informado sobre o passo do fuso do respectivo eixo e é acionada a função de auto parametrização. Em seguida inicia-se no respectivo eixo, um movimento oscilante lento de pequeno curso e progressivamente a velocidade deste movimento aumenta até o valor nominal do servo motor. Finalmente o servo motor é desativado e os ganhos da malha de controle são apresentados e salvos no servo drive.

Com o objetivo de isolar e adequar sinais elétricos entre o computador e os componentes elétricos, uma placa controladora foi instalada para garantir o isolamento de sinais de entrada e de saída.

3.1.3. Software Mach 3

Mach 3 é um programa muito flexível projetado para controlar máquinas, tais como, fresadoras, tornos e robôs manipuladores cartesianos. O software foi desenvolvido em plataforma Windows e trabalha com linguagem em código G. Este software possui uma interface muito amigável e sua configuração é muito simples, bastando apenas alguns dados da máquina desenvolvida.

Os comandos de programação em linguagem G são interpretados, traduzidos em formato proprietário e enviados a placa controladora via comunicação serial DB25. Essa placa controladora possui um

microcontrolador dedicado que gera de forma precisa os trens de pulsos para os servo drives e comandos para saídas auxiliares.

A tela básica de comando do Mach 3, (Figura 11), apresenta suas funções principais. No item 1 destaca-se a barra com as opções de configuração do software. Nessa barra de ferramentas têm-se as opções para criação de arquivos, configurações dos pinos de entrada e saída de sinais, rampa de aceleração dos motores, configurações de plugins, seleção de telas e edição das funções pertinentes aos botões da tela. Já no item 2 visualiza-se o programa em código G que será executado. Tal visualização do código em execução é fundamental, pois desta maneira é possível que o operador detecte algum erro de programação de trajetória e cancele a operação. No item 3 encontram-se as posições correntes dos eixos, bem como a opção de referenciá-lo. No item 4 tem-se a ilustração das trajetórias a serem realizadas, tal ilustração ajuda na detecção de erros mais grosseiros de trajetória. No item 5 o controle do processo com opções de start, stop, load Gcode, edit G code, entre outros. Este item traz as principais ações de comando do Mach 3. O item 6 mostra as informações pertinentes à ferramenta utilizada, onde se tem informações como o diâmetro, altura e posição no carrossel de ferramentas. Os dados relativos ao feed rate da máquina são vistos no item 7. Aqui é factível a alteração da velocidade de deslocamento no transcorrer da execução da trajetória, a fim de corrigir possíveis erros de programação.

Figura 11 - Tela de visualização Mach3.

3.1.4. Projeto controle de poluição

O lavador de gás é um dispositivo empregado no controle da poluição atmosférica na recuperação de materiais, no resfriamento e na adição de líquido ou vapor nas correntes gasosas. As partículas sólidas presentes em um fluxo de gás são coletadas através do contato direto com um líquido atomizado, geralmente a água.

A área de trabalho foi confinada numa caixa de contenção para evitar o espalhamento dos resíduos gerados pelo corte a laser no ambiente. Nesta caixa foi instalado um exaustor que direciona o ar poluído a um lavador de gases (Figura 12). Basicamente, o lavador de gases consiste em dois sistemas de purificação: o primeiro é onde há injeção de água pulverizada para decantar os detritos, depois pelo segundo sistema que é um conjunto de telas de nylon pelo qual o ar passa antes de ser lançado na atmosfera.

Figura 12 – Lavador de gases.

3.2.

Laser YLS 1500 – TR

O laser utilizado nos experimentos é a fibra óptica modelo YLS 1500 – TR da IPG Photonics, o mesmo possui as especificações apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4- Dados técnicos do laser Nd:YAG YLS 1500 TR.

Característica	Valor	Unidade
Modo de operação	Onda Contínua	-----
Potência Máxima	1500	Watts
Comprimento de onda da emissão	1065	nm
Largura da banda	4,8	nm
Tempo de ligar	26,8	µm
Tempo de desligar	21,6	µm
Instabilidade de potência de saída	0,2	%
Potência de saída feixe guia	937	µW

A Figura 13 mostra o laser a fibra YLS – 1500 TR, cujo mesmo possui um lançador, Figura 14, que é conectado à cabeça do laser.

Figura 13–Laser a fibra YLS – 1500 TR com potência máxima de 1500 W.

Figura 14 – Ponteira do Laser YLS-1500 TR

Esta bancada experimental é fácil de operar e confiável. Com poucas adaptações em seu projeto pode ser empregado em outras aplicações, como por exemplo, mesa para solda de metais ou gravação, entre outros.

4. Materiais, Metodologia e Resultados

Neste capítulo estão especificados os materiais utilizados em cada experimento, bem como a metodologia adotada para a realização dos mesmos com apresentação dos resultados obtidos.

4.1. Materiais

Os materiais estudados foram:

4.1.1. Aço SAE 1020

O aço SAE 1020 é um aço carbono com ligas metálicas constituídas basicamente de ferro, carbono, silício e manganês, apresentando também outros elementos inerentes ao processo de fabricação em percentuais controlados. É usado em parafusos, chassis, discos de rodas, peças em geral para máquinas, entre outras.

4.1.2. Aço SAE 1020 com anteparo (rocha travertino)

O travertino é um tipo de rocha similar às rochas carbonáticas encontradas no reservatório de petróleo. O travertino é uma rocha calcária composta de calcita, aragonita e limonita com bandas compactas, paralelas entre si, nas quais se observam pequenas cavidades.

4.1.3.

Aço Inox AISI 304L

Este tipo de aço é mais comum de ser encontrado. Ele abrange um grupo de ligas cromo-níquel austeníticos. Também conhecido como 18/8 inoxidável devido à sua composição química que inclui cerca de 18% de cromo e 8% de níquel em peso. Os aços AISI 304 são fáceis de soldar, fabricar e, por sua resistência à corrosão, entre outras, são amplamente utilizados nas indústrias de processamento de alimentos e bebidas.

4.1.3.

Aço Duplex 2205

Os aços inoxidáveis duplex ferríticos-austeníticos fazem parte de uma classe de materiais com microestrutura bifásica, composta por uma matriz ferrítica e ilhas de austenita com frações volumétricas aproximadamente iguais dessas fases. Essa classe de materiais é considerada bastante versátil por apresentar interessante combinação de elevadas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão. Os aços inoxidáveis duplex são frequentemente utilizados nas indústrias química e petroquímica de papel e celulose, siderúrgicas, alimentícias e de geração de energia.

4.2.

Metodologia

Os experimentos foram divididos em quatro grupos:

1. Estudo da morfologia do corte a laser no Aço SAE 1020, com potência constante e variação da densidade de potência.
2. Estudo da morfologia do corte a laser no Aço SAE 1020, com densidade de potência constante e variação de spot size.
3. Estudo do corte a laser no Aço Inox AISI 304L submerso em água.
4. Análise metalográfica do Aço Duplex 2205 após o corte a laser sob diferentes densidades de potência.

Para os estudos realizados nos grupos 1, 2 e 4, o corte a laser foi feito em padrão circular. Visando a obtenção de um furo como produto final, a cabeça do laser executou o corte descrevendo a forma de um espiral de dentro para fora, com passo de 0,15mm até atingir o diâmetro de 5mm (Figura 15).

Figura 15 - Trajetória espiral.

No grupo 3, o corte a laser foi realizado de forma linear.

Nos Experimentos 1 e 2, com o objetivo de manter um dos parâmetros constante (potência ou densidade de potência), foi necessário variar a distância focal, como representado na Figura 16. Note que em alguns experimentos o foco é negativo e em outros, positivo.

Figura 16–Diagrama esquemático da focalização do feixe.

4.2.1.

Experimento 1 – Potência constante e variação da densidade de potência

Neste grupo de experimentos utilizaram-se três amostras (placas) de Aço SAE 1020, com diferentes configurações, como apresentado na Tabela 5. Note que no Experimento 1.3, colocou-se um anteparo (rocha travertino) atrás da placa de aço (Figura 17). Estas configurações tiveram por objetivo analisar o efeito do corte com mudança da espessura de 5mm para 10mm e avaliar os cortes com presença do anteparo.

Tabela 5 - Configurações das amostras do Experimento 1.

Experimento	Espessura (mm)	Amostra	Velocidade (mm/min)
1.1	5	SAE 1020	700
1.2	10	SAE 1020	100
1.3	10	SAE 1020 com anteparo	100

Figura 17 – Fotografia das amostras utilizadas nos experimentos 1.3 e 2.3.

Em cada placa de aço, executaram-se 15 cortes a laser, sendo estes realizados sob a potência constante de 1500W, com variação da densidade de potência ($0,014 \text{ MW/cm}^2 \sim 11,58 \text{ MW/cm}^2$) através da alteração da distância focal. Para a espessura de 5 mm foram feitos cortes na velocidade de 700 mm/min e na espessura de 10 mm, os cortes foram realizados na velocidade de 100 mm/min. A Tabela 6 ilustra a sequência de cortes realizados em cada placa, bem como seus respectivos parâmetros.

Tabela 6 - Parâmetros de operação do experimento 1.

Distância do foco (mm)	Spot Size (mm)	Densidade potência (MW/cm^2)	Potência (W)
-3	0,39	1,23	1500
-2	0,30	2,05	1500
-1	0,21	4,05	1500
0	0,13	11,58	1500
1	0,21	4,05	1500
2	0,30	2,05	1500
3	0,39	1,23	1500
4	0,48	0,82	1500
5	0,56	0,59	1500
10	1,00	0,18	1500
20	1,89	0,053	1500
25	2,33	0,035	1500
30	2,77	0,024	1500
35	3,21	0,018	1500
40	3,65	0,014	1500

4.2.1.1.

Resultados do Experimento 1

Para avaliar a morfologia do corte foram escolhidos como parâmetros de qualidade, a conicidade do formato do corte e a formação de rebarbas. A conicidade é definida como a razão entre os diâmetros da superfície superior (lado de incidência da luz) e o diâmetro da superfície inferior. A conicidade possibilita que seja feita a análise do efeito da mudança da espessura da amostra.

No experimento 1 procurou-se avaliar o efeito da variação de densidade de potência.

Para facilitar a compreensão dos resultados obtidos, elaborou-se um esquema ilustrativo (Figura 18) da distribuição de densidade de potência ao longo da espessura de uma amostra de aço de 10mm de espessura. Os valores indicados de densidade de potência correspondem para o caso de um feixe focalizado na superfície superior da amostra com potência de 1500W e spot size de 0,13mm. A linha tracejada azul indica a interface entre as regiões de vaporização e de fusão.

Figura 18 - Esquema dos valores da densidade de potência em função da espessura da amostra.

4.2.1.1.1.

Experimento 1.1 (@ 5mm)

Os resultados da Figura 19 referem-se a uma placa com espessura de 5mm. Este gráfico mostra a conicidade do corte e a densidade de potência em função da distância focal. Observa-se que a conicidade é regida por dois comportamentos bem definidos. Na zona de vaporização (área sombreada) a conicidade é mínima, igual a 1,1 e não varia. Por outro lado, na zona de fusão, a conicidade aumenta conforme aumenta a distância focal. Através de um ajuste linear, o aumento da conicidade foi estimado em $0,034 \text{ mm}^{-1}$.

Note que a área sombreada delimita a região onde ocorreu a vaporização do metal, denominada zona de alta densidade de potência (acima de 1 MW/cm^2). Já a área não sombreada, denominada zona de baixa densidade de potência (abaixo de 1 MW/cm^2), corresponde à área onde o aço sofreu apenas a fusão.

Figura 19 - Gráfico referente ao Experimento 1.1.

Na tabela 7 são apresentadas as fotos e os respectivos parâmetros de operação de três dos quinze cortes realizados no experimento 1.

Este experimento caracterizou-se pela ausência de rebarbas na superfície superior. Entretanto, rebarbas de aproximadamente 3,85mm de altura foram observadas na superfície inferior (Figura 20), para o caso de baixa densidade de potência.

Além do evidente aumento da conicidade em função da diminuição da densidade de potência observa-se também que o diâmetro D1 é maior que 5mm. Este é um resultado direto do aumento do spot size. Neste experimento não fica claro a influência do tamanho do spot size, assim, cabe perguntar-se como seria a morfologia de um corte quando a densidade de potência fosse 0,053 MW/cm² a uma distância focal de poucos milímetros? Este assunto será discutido no experimento 2.

Tabela 7 - Imagens referentes ao Experimento 1.1.

Distância do foco	0 mm	20 mm	40 mm
Densidade de potência	11,5 MW/cm ²	0,053 MW/cm ²	0,014 MW/cm ²
Imagem

Figura 20 - Superfície inferior da amostra do Experimento 1.1.

4.2.1.1.2.

Experimento 1.2 (@ 10mm)

Os resultados da Figura 22 referem-se a uma placa de 10 mm. De uma forma geral, as morfologias dos cortes realizados seguem um padrão semelhante ao observado no experimento 1.1. Com algumas diferenças com relação ao aumento da conicidade, que neste caso foi duas vezes o valor observado na placa de 5mm, ou seja 0,068mm⁻¹.

Figura 21 - Gráfico referente ao Experimento 1.2.

Nas fotos apresentadas na Tabela 8, nota-se a relevante formação de rebarbas na superfície superior. Para o caso de distância focal zero, a rebarba é discreta, sendo mais larga que alta. Por outro lado, para o corte com distância focal de 40mm observou-se rebarba volumosa com até 6 mm de altura.

A formação da rebarba pode ser compreendida se considerarmos a distribuição de potência ao longo da espessura da amostra para o caso de distância focal igual a 0mm. Visto que a espessura da amostra é de 10 mm, e a vaporização do aço só ocorre até, no máximo, aproximadamente 3,25mm de profundidade. Então, resta uma significativa parte do material (aproximadamente 6,75mm) que sofre apenas fusão. A injeção do gás auxiliar gera um refluxo no material fundido para a superfície superior da amostra, resultando na formação de rebarbas de aproximadamente 1,5 mm de altura e 6,7 mm de extensão sobre a superfície. Conjuntamente, o perfil cônico do furo favorece o deslocamento do material fundido para a superfície superior, tudo isso ocorre enquanto o corte não for passante.

Tabela 8 - Imagens referentes ao Experimento 1.2.

Distância do foco	0	20	40
Densidade de potência	11,5 MW/cm ²	0,053 MW/cm ²	0,014 MW/cm ²
Imagem

Figura 22 - Superfície inferior da amostra Experimento 1.2.

4.2.1.1.3.

Experimento 1.3 (@ 10mm com anteparo)

Os resultados da Figura 23 referem-se a uma placa de 10 mm com anteparo. Neste caso a presença do anteparo induz um aumento significativo da formação de rebarba quando comparado com o experimento 1.2. Observa-se também, que a conicidade não é regida por comportamento bem definido.

Figura 23 - Gráfico referente ao Experimento 1.3.

Sob condição de alta densidade de potência, observou-se que não somente a placa de aço tinha sido cortada, como também o anteparo perfurado, dando origem a um orifício. O aço fundido, que no experimento 1.2 fazia parte da formação rebarba da superfície inferior, neste caso passou a escoar para dentro da rocha, depositando-se nas paredes. A geometria cilíndrica deste material depositado pode ser observada nas fotos da Figura 24.

Figura 24 - Material depositado na parede do anteparo do experimento 1.3.

Entretanto, sob a condição de baixa densidade de potência, observou-se que somente a placa foi cortada. No caso do anteparo, a superfície logo abaixo do corte sofreu uma leve ablação sem a formação de orifício.

A Figura 25 representa a amostra do experimento 1.3 no campo esquerdo, note que sob a condição de alta densidade de potência, o feixe de laser atravessa a amostra em menos tempo fazendo com que o material fundido escoe para o anteparo e quase não tenha rebarbas altas. Já no campo direito, sob baixa densidade de potência, há a formação de rebarbas grandes na parte superior e, praticamente, ausência de material fundido no anteparo. Isto ocorre porque o feixe de laser demora mais tempo para atravessar completamente a amostra.

Figura 25 – Imagem do resultado final da amostra do experimento 1.3.

De forma geral (nas imagens da Tabela 9) observa-se uma elevada formação de rebarba ainda mais volumosa. Este aumento se deve ao retorno de todo material fundido pelo anteparo, resultado numa altura de até 10mm.

Tabela 9 – Imagens referentes ao Experimento 1.3.

Distância do foco	0	20	40
Densidade de potência	11,5 MW/cm ²	0,053 MW/cm ²	0,014 MW/cm ²
Imagem

4.2.2

Experimento 2 – Densidade de potência constante e variação da potência

No experimento 2 utilizou-se o mesmo tipo e quantidade de amostras que no experimento 1, ou seja, três placas de Aço SAE 1020, com as mesmas configurações, como apresentado na tabela 10. A ideia de se utilizar estas configurações teve por objetivo analisar o efeito do corte com mudança da espessura de 5mm para 10mm e avaliar os cortes com a presença do anteparo.

Tabela 10 - Configurações das amostras do Experimento 2.

Experimento	Espessura (mm)	Amostra	Velocidade (mm/min)
2.1	5 mm	SAE 1020	700
2.2	10 mm	SAE 1020	100
2.3	10 mm	SAE 1020 com anteparo	100

Em cada placa de aço foram feitos 6 cortes a laser, sendo estes realizados sob densidade de potência constante de 0,053 MW/cm², com variação da potência (100 ~1500W), através da alteração da distância focal, como no Experimento 1. Para a espessura de 5 mm foram feitos cortes na velocidade de 700 mm/min e na espessura de 10 mm os cortes foram realizados na velocidade de 100 mm/min. A Tabela 11 ilustra a sequência de cortes realizados em cada placa, bem como seus respectivos parâmetros.

Tabela 11 - Parâmetros de operação do experimento 2.

Distância do foco (mm)	Spot Size(mm)	Potência (W)	Densidade de Potência MW/cm ²
6	0,65	181	0,053 MW/cm ²
8	0,83	291	0,053 MW/cm ²
10	1,00	427	0,053 MW/cm ²
13	1,27	681	0,053 MW/cm ²
15	1,45	882	0,053 MW/cm ²
20	1,89	1500	0,053 MW/cm ²

4.2.2.1.**Resultados do Experimento 2**

Para facilitar a compreensão dos resultados obtidos e considerando que foco desta seção foi avaliar o efeito do spot size na morfologia do corte, elaborou-se um esquema ilustrativo (Tabela 12) da extensão do spot size em função da trajetória. Para todos os testes do Experimento 2 a densidade de potência foi mantida constante 0.053MW/cm² e o spot size foi variado entre 0.65mm e 1,89mm. Observe que para o caso de spot size igual 1,89mm são contidos 12 passos da trajetória (espiral).

Tabela 12- Relação de proporção do Spot size com o passo da espiral.

Distância do foco (mm)	Spot Size (mm)	
6	0,65
10	1,01
20	1,89

4.2.2.1.1.**Experimento 2.1 (@ 5mm)**

Os resultados da Figura 26 se referem a uma placa com espessura de 5mm. O gráfico mostra os diâmetros D1 e D2 correspondentes à superfície superior e inferior, respectivamente, em função da distância focal. Observa-se que conforme aumenta o spot size o diâmetro superior

D1 também aumenta, porém, na parte inferior da amostra, para algumas distâncias focais, não houve corte. Somente para valores de spot size acima de 13 mm foram constatados cortes passantes da placa.

Figura 26 - Gráfico referente ao Experimento 2.1.

Note, pelas imagens da Tabela 13, que à medida que o tamanho do spot size aumentou o corte resultante foi mais profundo. Isto acontece porque um spot size maior implica em uma área de incidência maior e, conseqüentemente, em uma incidência mais prolongada. Tudo isso, porque o laser passa um número de vezes maior por cima do mesmo ponto, o que resulta em um volume removido maior. Nesta dissertação este tipo de corte foi denominado corte por camadas.

Tabela 13 - Imagens referentes ao Experimento 2.1.

Distância do foco	6	10	20
Densidade	0,053 MW/cm ²	0,053 MW/cm ²	0,053 MW/cm ²
Spot Size	0,65 mm	1,01 mm	1,89 mm
Imagem			

Para exemplificar como ocorre o processo de cortes por camadas considere os pontos 1 e 2 na Figura 27. O ponto indicado pelo número 1 representa o centro do spot de 1,98mm de diâmetro e o número 2 representa um ponto arbitrário pelo qual o laser irá passar. Para que o ponto 1 alcance o ponto 2 é necessário que o laser faça 5 trajetórias circulares em espiral. Isto implica que no ponto 2 o corte por fusão já estivesse sendo realizado mesmo antes do centro do spot passar pelo ponto 2. Assim, até o ponto 1 chegar no fim da espiral, o ponto 2 terá sido irradiado 13 vezes no total. Desta forma, durante toda a duração do teste, o ponto 2 foi sofrendo perda do material derretido através do gás auxiliar.

Figura 27 - Exemplo do Experimento 2.

4.2.2.1.2.

Experimento 2.2 (@ 10mm)

Os resultados da Figura 28 referem-se a uma placa de 10 mm. De uma forma geral, as morfologias dos cortes realizados seguem um padrão semelhante ao observado no experimento 2.1 (Tabela 14). Com algumas diferenças com relação à diminuição do diâmetro D2, que para todos os casos é ligeiramente menor. O que está diretamente relacionado com a espessura da placa (10mm) e consequentemente com a diminuição de

densidade de potência ao longo da espessura, pois a densidade de potência na superfície inferior é 50% menor que na superfície superior (0.025MW/cm2). Cabe ressaltar, que o processo de fusão inicia-se a partir de 0,01MW/cm2.

Figura 28 - Gráfico referente ao Experimento 2.2.

Tabela 14 - Imagens referentes ao Experimento 2.2.

Distância do foco	6	10	20
Densidade	0,053 MW/cm²	0,053 MW/cm²	0,053 MW/cm²
Spot Size	0,65 mm	1,01 mm	1,89 mm
Imagem			

4.2.2.1.3.
Experimento 2.3 (@ 10mm com anteparo)

Os resultados da Figura 29 referem-se a uma placa de 10 mm com anteparo. Neste caso a presença do anteparo limitou ainda mais o diâmetro D2, quando comparado ao Experimento 2.2. O resultado foi dramático, pois o corte só ocorreu a partir do spot size de 1,9mm.

Figura 29 - Gráfico referente ao Experimento 2.3.

Tabela 15 - Imagens referentes ao Experimento 2.3.

Distância do foco	6	10	20
Densidade	0,053 MW/cm²	0,053 MW/cm²	0,053 MW/cm²
Spot Size	0,65 mm	1,01 mm	1,89 mm
Imagem			

A partir dos parâmetros de operação do experimento 2, pode-se concluir que para cortes na faixa de baixa densidade de potência (0,053

MW/cm²), a razão entre o spot size e o passo da espiral deve ser maior que 13, a fim de garantir o corte.

4.2.3.

Experimento 3 - Corte a laser no Aço Inox AISI 304L submerso em água.

No terceiro grupo de experimentos foram realizados dois cortes a laser na placa de aço inox AISI 304L (1 mm de espessura) com uma parte da amostra submersa em água. Para isso foi utilizado um suporte inclinado que possibilitou a variação da lâmina da água em função do comprimento da amostra. O objetivo deste ensaio foi determinar a máxima lâmina de água para o qual o laser consegue cortar aço para a densidade potência constante igual a 0,011 MW/cm². Na Figura 18 observa-se uma foto do ensaio e um diagrama esquemático da movimentação do laser em função do plano inclinado. Tanto a distância focal, como a potência do laser permaneceram inalteradas ao longo do experimento, resultando numa densidade de potência constante.

Figura 30 – Diagrama esquemático e fotografia da montagem experimental.

4.2.3.1.

Resultados do Experimento 3

Os resultados apresentados nessa seção são referentes aos experimentos de corte a laser na placa de aço inox parcialmente submersa em água. O objetivo deste experimento foi determinar se o feixe do laser

conseguiria cortar a região da placa que estava submersa. Os parâmetros de operação utilizados foram: densidade de potência ($0,011 \text{ MW/cm}^2$), potência máxima do laser (1500W) e distância focal ($4,5 \text{ cm}$). O valor da distância focal foi definido de forma que a cabeça do laser não entrasse em contato com a água durante os experimentos.

Realizaram-se dois experimentos. No primeiro, utilizou-se a injeção do gás auxiliar (N_2). Já no segundo teste não foi utilizado o gás auxiliar porque foi constatado que o acionamento do mesmo deslocava toda a lamina de água, como pode ser observado nas Figuras 31 e 32.

Figura 31 – Fotografia do experimento embaixo da água para a primeira (a) e segunda (b) etapa respectivamente

Figura 32 – Fotografia do experimento embaixo da água para a primeira (a) e segunda (b) etapa respectivamente

O resultado global do experimento pode ser visto na Figura 33. Observe que foram delineadas duas linhas vermelhas horizontais, uma linha contínua e outra tracejada. A linha contínua representa o término da região seca e o início da região submersa, a linha tracejada indica o ponto a partir do qual não houve mais evidências visuais da interação do laser com o metal.

No primeiro experimento, com o gás auxiliar acionado, o corte mostrou-se eficiente. Contudo, constatou-se que o gás auxiliar havia deslocado a lamina de água completamente, invalidando o teste (Fig. 33).

No segundo experimento, sem o acionamento do gás auxiliar, não houve corte da placa. Observou-se simplesmente uma ablação da superfície (detalhe Fig. 33), sendo que a ablação na região submersa é inicialmente mais intensa e diminui à medida que a lâmina de água aumenta. Este resultado é uma consequência das perdas devidas à absorção da luz na água e da reflexão na interface Ar - água. Cabe ressaltar que as perdas por reflexão na interface Ar - água representam somente 1% da densidade de potência total (reflexão de Fresnel).

Considerando que 0.011 MW/cm^2 é uma densidade de potência, que apenas induz à fusão do material, o acionamento do gás auxiliar se faz necessário para conseguir cortar a placa, como observado na Figura 33.

Figura 33 - Resultado final da placa após os ensaios na água.

A equação de Beer-Lambert foi utilizada com o objetivo de determinar a densidade de potência que realmente atingiu a placa. Substituindo-se na equação 7 o coeficiente de absorção da água $\alpha = 6,0944 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-1}$ (Hale, 1973), para $\lambda = 1,065 \text{ }\mu\text{m}$, –foi obtido o gráfico de densidade de potência em função da lâmina de água (Figura 34). Note que a densidade de potência diminuiu 55% para apenas 1mm de lâmina de água.

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \quad (7)$$

Figura 34 - Gráfico da diminuição da densidade de potência em função da profundidade.

Conclui-se então, que o comprimento de onda é um parâmetro fundamental na escolha do laser a ser utilizado em testes de processamento de materiais na presença de água. Considerando-se o gráfico da absorção da água (Figura 35), o comprimento de onda ideal seria algo em torno de 500 nm.

Figura 35 - Gráfico espectral da absorção em função do comprimento de onda.

4.2.4.

Experimento 4 - Análise metalográfica do Aço Duplex 2205

Neste último grupo de experimentos, foi realizado um estudo metalográfico do Aço Inox Duplex 2205 após o corte a laser. O objetivo desta etapa foi analisar a alteração na microestrutura do aço, a fim de investigar as mudanças nas propriedades mecânicas do material. Para isto, foram selecionadas três faixas de densidade de potência: alta, média e baixa, como especificadas na Tabela 9.

Tabela 16 - Parâmetros de operação do experimento 4.

Faixa	Densidade de Potência (MW/cm ²) @1500W
Alta densidade	11,5
Média densidade	1
Baixa densidade	0,053

Para cada faixa de potência foram feitos dois cortes com o raio espaçamento de 30 mm, como mostra a Figura 19.

Figura 36 - Esquema de distribuição dos cortes feitos na amostra nas densidades potência alta (1), média (2) e baixa (3).

4.2.4.1.

Resultados do Experimento 4

Os resultados aqui apresentados referem-se à análise metalográfica dos cortes feitos no aço inox duplex 2205. Esta análise foi realizada pelo Instituto Tecnológico PUC-Rio (ITUC). O objetivo foi a avaliação microestrutural das regiões adjacentes aos cortes a fim de determinar as variações na microestrutura e extensão da região modificada em função do grau de energia aplicada ao material durante o processo. Neste experimento foram usadas três faixas de densidade de potência: alta (11.500 kW/cm²), média (1.000 kW/cm²) e baixa (53,54 kW/cm²). Para cada densidade de potência foram realizados dois cortes, sendo estes espaçados entre si por um raio de 30 mm

A análise microestrutural foi realizada nas seções transversais das amostras. Na região dos furos foi realizado um corte ao longo da espessura, de forma que as áreas afetadas pudessem ser observadas. As amostras foram preparadas metalograficamente de acordo com a especificação ASTM E3 e atacadas quimicamente com o reagente água régia glicerizada. Posteriormente foram observadas ao microscópio óptico.

Para efeitos de comparação, uma seção da amostra base isenta de irradiação laser foi removida. A microestrutura do material base é composta por ferrita e austenita, onde os grãos mais escuros caracterizam a austenita e parte mais clara representa a ferrita (Figura 37).

Figura 37 - Seção transversal da amostra base. A microestrutura é composta por ferrita e austenita.
Fonte: ITUC, 2014.

A Figura 38 apresenta as fotos da seção transversal e as imagens da microestrutura das amostras para cada densidade de potência (baixa, média e alta respectivamente). Se comparadas com a Figura 37, a região afetada caracteriza-se por uma diminuição do tamanho dos grãos austeníticos (detalhe em vermelho).

Densidade de potência baixa

Densidade de potência média

Densidade de potência alta

Figura 38 - Seção transversal das amostras.

Um gráfico da extensão da região afetada em função da densidade de potência pode ser observado na Figura 39. A extensão da região afetada aumenta de forma não linear conforme a densidade de potência aumenta.

Figura 39- Modelo gerado no qual mostra a tendência da extensão da área afetada em função da densidade de potência.

A diminuição dos grãos austeníticos é decorrência do resfriamento rápido do material, o que estimula a nucleação de grãos e inibe o crescimento. Em geral, o tamanho do grão é um fator importante para avaliar as propriedades mecânicas de um material policristalino, em especial, a dureza, a resistência à corrosão e o limite de escoamento. Assim, um material com grãos mais finos possui maior dureza e resistência mecânica do que um material com grãos grosseiros. Pode-se então concluir de forma qualitativa que a região adjacente ao corte sofre uma transformação microestrutural e a extensão desta transformação depende do calor transferido durante o processo. Estudos mais aprofundados a respeito das propriedades mecânicas da região afetada serão realizados futuramente.

5 Conclusão

Analizando os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados e vislumbrando um sistema laser aplicado no processo de canhoneio, conclui-se que:

A densidade de potência deve ser maior $1\text{MW}/\text{cm}^2$, ao longo de toda a espessura do material metálico, a fim de garantir a evaporação do mesmo, minimizando a quantidade de material depositado no orifício do anteparo rochoso. Observou-se que o material derretido deposita-se nas paredes do anteparo quando a densidade não é suficiente para evaporá-lo. É importante ressaltar que isto só é possível com a injeção do gás auxiliar. Mesmo prematuro, se pensando uma implementação direta desta técnica no poço, fica em aberto se é realmente possível fazer uma injeção de gás no fundo do poço sem desestabilizar a pressão hidrostática do mesmo.

Outra consideração não menos importante, se pensarmos em uma implementação de poço, é a perda de energia por absorção. Um estudo cuidadoso deve ser realizado a fim de determinar a quantidade de energia perdida devido à absorção da luz pelos fluidos presentes no poço durante o canhoneio a laser. Observou-se que para o comprimento de onda (1065nm), as atenuações podem ser de até 50% para uma lâmina de água de apenas 1mm. Estudos futuros deverão ser realizados a fim de determinar as constantes de atenuação dos fluidos tipicamente encontrados no poço. Ainda mais se no futuro uma ferramenta a laser chegar a ser desenvolvida, novos fluidos de completação deverão ser utilizados a fim de minimizar ao máximo as atenuações.

Com relação à análise metalográfica, conclui-se que a extensão da área adjacente afetada pela densidade de potência aumenta conforme aumenta a densidade de potência. Entretanto para a máxima densidade de potência analisada constatou-se que a extensão é de apenas 2mm.

Referências Bibliográficas

Faro, T.M.C.C.B.; “Estudo e Optimização do Corte a Laser de Alta Velocidade em Chapa Metálica Fina”, Dissertação de mestrado do Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, junho de 2006.

Mazumder, J.; Steen, W.M.; “Laser Material Processing”, 4th edition, Editora Springer, 2010.

Gladush, G.G.; Smurov, I.; “Physics of Laser Materials Processing”, 1st edition, Editora Springer, 2011.

Sanches, J.M.; “Desenvolvimento de uma Fresadora CNC de Baixo Custo para Fins Didáticos”, Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 2009.

Bellarby, J.; “Well Completion Design”, 1st edition, Editora Elsevier, 2009.

Amaro, R.; “Análise da Viabilidade da Perfuração de Rochas com a Utilização do Laser”, Dissertação de mestrado, Departamento Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2013.

Burakowski, T.; Wierzchón, T.; “Surface Engineering of Metals: Principles Equipment and Technologies”, Editora CRC Press, 1999.

Ion, J.C.; “Laser processing of Engineering Materials”, Editora Elsevier, 2005

Oliveira, A.C.; “Microsoldagem em Chapas Finas Utilizando um Laser de Cu-HBr”, Dissertação de mestrado, Curso de Física e área de Física Atômica e Molécula, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2006.

Bakhtbidar, M., Ghorbankhani, M., et. al; “Applications Laser Technology for Oil and Gas Wells Perforation”, Artigo, SPE/IADC 148570, 2011.

Schneider, M., Berthe, L., Fabbro, R., Muller, M.; “Measurement of Laser Absorptivity for Operating Parameters Characteristic of Laser Drilling Regime”, Artigo, publicado em “Journal of Physics D: Applied Physics 4, 15 (2008) 6”, 2008.

P. Sihna, A. Gour D. “Laser Drilling Research and Application: An Update”, Artigo, SPE/IADC 102017, 2006.

Xu, Z.; Reed, C. B.; et. all.; “ROCK PERFORATION BY PULSED ND:YAG LASER”, Artigo, publicado no 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, 2003.

Xiao, Z.; “Fiber Laser Cutting of Mild Steel”, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Lappeenranta University of Technology, 2007.

Leong, K.H., Xu, Z, Reed, C.B., Parker, R.A.; “Laser and Beam Delivery for Rock Drilling”, Apostila, Tecnology Development Division – Argonne National Laboratory, The University of Chigado for the United States Department of Energy.

Sharma, R.S.; “Weldability of Advanced High Strength Steels using Yb:YAG high power laser for Tailor-Welded Blank”, Tese para obtenção do título PhD, Departamento de Engenharia Mecânica, Iowa State University, 2011.

Writzl, V.; “Influência dos parâmetros da Têmpera superficial a Laser por Diodo na Microestrutura dos Aços Ferramenta para trabalho a Frio”, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia de Mecânica e de Materiais

Albert, F.; Grimm, A.; Schmidt, M.; “Influence of different laser operation regimes on the specific energy required for rock removal in oil and gas well drilling applications”, Artigo, Photonics North 2009, edited by RéalVallée, Proc of SPIE Vol. 7386, 2009.

Valente L. C. G.; Pérez M. A. A.; Gouvêa P. M. P.; Martelli C.; Avillez R. R.; Braga A. M. B.; “*Energy Efficiency of Drilling Granite and Travertine with CO2 Laser and 980 nm Diode Laser*”, Artigo, 2012.

Bakhtbidar, M., Alimohammadi, M., et. Al; “Experimental Investigation of Adapting High Power Laser Technology for a Revolutionary Application in Oil and Gas Wells Drilling”, Artigo.

Grahan, B.C., Batarseh, S., Sharma, B., et. al.; “Analysis of Efficient High-Power Fiber Lasers for Well Perforation”, Artigo, SPE 90661, 2004.

Introduction to Industrial Laser Materials Processing, ed. RofinSinar, Hamburg, 2004.

Silva, S.C.; “Mecanismos de Trincamento de aço Microestrutura austeno-ferrítica em meio corrosivo”, Monografia, Curso de Engenharia Metalúrgica, UFRJ, 2011.

Senatora, M.,Finzeto, L.; Perea, E.; “Estudo comparativo entre os aços carbonos inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L”, Artigo – REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 60(1): 175 -181, jan. mar , 2007.

Pereira, P.A.S.; “Efeito da energia de soldagem na microestrutura de um aço inoxidável duplex e superduplex”, Dissertação de Mestrado, Mestrado

em Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro, UENF, 2009.

Oliveira, M.F.; Guilherme, L.H.; “O estado da Arte da precipitação de Fase Sigma em Aços Inoxidáveis Austeníticos: Foco na Liga AISI 316L”, Artigo, baixado no site: <http://soudap.com.br/wp-content/uploads/2012/11/Artigo-completo-COMPLETO-E-CORRIGIDO.pdf> acessado agosto de 2014.

Zempulski, P.R.S.; “Correlação de propriedades eletroquímicas da fase sigma com propriedades mecânicas e metalográficas em aços inoxidáveis duplex SAF2205”, Dissertação de mestrado, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, 2011.

Hale, G.M., Querry, M.R.; “Optical Constants of Water in the 200 nm to 200 μ m Wavelength Region” Artigo publicado em março de 1973, APPLIED OPTICS, Vol. 1, N° 3, 1973

Messer, – <http://www.messer-cs.com/pt/south-america/processos/corte-a-laser/> - acessado no dia 12/09/2014.

Liebowitz, - <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-29/issue-3/features/high-power-direct-diode-lasers-for-cutting-and-welding.html> - acessado no dia 12/09/2014.

Mayer, A.; “Laser Market at Record High” – Artigo publicado no 11th International Laser Marketplace provides insight into the global market of laser materials processing. – 2013.

Hecht, J.; “High Power Lasers: Fiber lasers drill for oil” - <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-48/issue-12/world-news/high-power-lasers-fiber-lasers-drill-for-oil.html> –Matéria publicada no dia 12/05/2012 – Acesso em 16/09/2014.

Vanguard; “Drilling: Using high power lasers for oil, gas wells” - <http://www.vanguardngr.com/2014/07/drilling-using-high-power-lasers-oil-gas-wells/> - Matéria publicada no dia 01/07/2014 – Acesso em 16/09/2014.

Zediker, M.; “High-power fiber lasers for geothermal, oil, and gas industries” <http://spie.org/x106865.xmlb> -Matéria publicada no dia 11/04/2014. Acesso em 16/09/2014.